

## **ADSORBIMENTO**

L'adsorbimento è un fenomeno chimico fisico che regola l'interazione tra le molecole contenute in un certo fluido e la superficie con cui tale fluido viene a contatto. Tale interazione consiste nella formazione di legami chimici di intensità variabile, tra una parte delle molecole presenti nel fluido e gli atomi costituenti la superficie del solido: tali legami possono essere deboli (legami secondari), e quindi reversibili al mutare delle condizioni fisiche del sistema, o forti (legami primari) caratterizzati dal fatto di non essere reversibili.

### **Descrizione tecnica**

I materiali adsorbenti di utilizzo tecnologico sono di diversa natura in funzione delle caratteristiche delle sostanze con cui vengono fatti interagire, gel di silice, allumina, zeoliti, carbone attivo; a differenza dell'assorbimento fenomeno per cui la sostanza gassosa diffonde nella fase liquida fino ad annullare il gradiente di concentrazione, nell'adsorbimento le molecole di gas si fermano in punti specifici della superficie detti siti attivi, da cui poi modificando le condizioni ambientali possono essere rimossi. In quest'ultimo caso si parla di *adsorbimento fisico* dovuto a forze di Van der Waals responsabili dei legami secondari deboli. Nel caso in cui le forze di interazione tra molecole di gas e solido siano dell'ordine di grandezza di quelle del legame tra atomi nella molecola, si parla di *adsorbimento attivato* o *chemiadsorbimento*: in questo caso sulla superficie del solido si formano veri e propri composti chimici, in seguito a reazioni esotermiche e quindi non risulta più possibile il recupero del composto adsorbito a meno di non operare in condizioni tali da favorire la decomposizione dello stesso: l'ossigeno ad esempio viene adsorbito su carbone attivo e può essere rimosso ad alta temperatura, liberando CO e CO<sub>2</sub>, ovvero decomponendo una parte del solido adsorbente.

La tecnica che sfrutta questo fenomeno per depurare l'aria, utilizza la formazione di legami deboli al fine di poter riutilizzare il solido assorbente dopo la fase di desorbimento: i composti gassosi che formano legami irreversibili con il solido adsorbente sono considerati "veleni" in quanto riducono la superficie attiva in modo permanente e vanno perciò eliminati dalle miscele da depurare.

Il processo è regolato dalle isoterme di Freundlich, curve che rappresentano per ogni temperatura, l'andamento della concentrazione del gas nel solido con la pressione di esercizio: da queste curve si vede come il processo sia favorito per una certa temperatura, da alte pressioni, ovvero da alta concentrazione nella fase gassosa, e per una certa pressione da basse temperature, ovvero da una condizione che favorisce la formazione del legame.

Tra i materiali adsorbenti uno dei più utilizzati per il trattamento dell'aria è il carbone attivo:

Il carbone attivo è un solido di origine vegetale o minerale costituito da materiale microporoso, caratterizzato da un'elevata superficie specifica che può essere ottenuto attraverso un processo di attivazione chimica (trattamento con acidi forti H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>) o termica (riscaldamento a 900 °C in atmosfera controllata). Materie prime a partire dalle quali si può ottenere carbone attivo sono torba, gusci di noce e noccioline; viene prodotto in diverse forme fisiche in polvere, estruso in granuli.

Le applicazioni tecnologiche sfruttano in genere la formazione di legami deboli che, essendo reversibili, permettono di recuperare le sostanze adsorbite e rigenerare il potere adsorbente del materiale. La forza dei legami che si stabiliscono è variabile in funzione delle caratteristiche delle sostanze presenti nel fluido e questo influenza l'efficienza della tecnica di abbattimento.

Il materiale viene classificato in funzione dei seguenti parametri strutturali:

- granulometria
- superficie specifica, il peso specifico può variare da 300 a 400 kg / mc.
- contenuto di ceneri (ovvero di sostanza non attiva per l'adsorbimento)
- contenuto di umidità
- indice di benzene, parametro che permette di valutare l'affinità del carbone per varie categorie di composti organici.
- I parametri operativi, che regolano il funzionamento del sistema sono:

- l'efficienza di adsorbimento /valutata normalmente in percentuale come differenza tra le concentrazioni delle sostanze nel flusso in entrata e nel flusso in uscita;
- la condizione di saturazione;
- la capacità di adsorbimento, ovvero la quantità massima di sostanza che il carbone può fissare fino al raggiungimento delle condizioni di saturazione (si misura come massa di sostanza fissata in grammi per quintale di carbone attivo).
- Considerando il sistema costituito dalla porzione aerea a contatto con la superficie e da una porzione della superficie adsorbente stessa si possono distinguere nel processo d'adsorbimento tre stadi:
  - diffusione del componente gassoso all'interno della fase aerea verso la superficie (lento);
  - diffusione nella fase solido (lento);
  - formazione del legame (veloce ed esotermico).

Il processo complessivo è favorito in condizioni che rendano più veloci i primi due stadi e che bilancino l'esotermicità della reazione, cioè alta pressione parziale del gas sulla superficie (alta concentrazione del componente affine nel flusso) e condizioni di bassa temperatura.

Altri solidi adsorbenti sono allumina attivata e gel di silice, particolarmente adatti all'adsorbimento di composti polari, e zeoliti sintetiche o setacci molecolari che vengono appositamente prodotti con la porosità necessaria per la specifica applicazione.

In alcuni casi il potere adsorbente del solido può essere modificato per aggiunta di appositi impregnanti oppure l'impregnante può essere disperso su un solido inerte caratterizzando in tal modo la reazione con il gas: gli impregnanti possono essere sostanze reattive con il componente inquinante o catalizzatori che favoriscono la decomposizione della sostanza inquinante.

Il carbone attivo impregnato di iodio trattiene i vapori di mercurio, con acetato di piombo trattiene l'acido solfidrico e con silicato di sodio trattiene l'acido fluoridrico: in questi casi l'inquinante è trasformato in sostanze meno pericolose e i prodotti di reazione sono trattenuti sul solido pertanto il materiale adsorbente una volta esaurito deve essere eliminato.

Nella tabella che segue è riportato un elenco di impregnanti e inquinanti sui quali esse agiscono.

supporto	impregnante	Inquinante
Carbone attivo	Bromo	Etilene, alcheni
	Acetato di piombo	Acido solfidrico
	Silicato di sodio	Acido fluoridrico
	Acido fosforico	Ammine, ammoniaca
	Iodio	Mercurio
	Solfuro di sodio	Mercurio, cadmio
	Solfito di sodio	Formaldeide
	Carbonato di sodio	Acidi
	Ossidi di rame, cromo, vanadio	Sostanze ossidabili
	Metalli nobili	Sostanze ossidabili
Allumina attivata	Permanganato di potassio	Formaldeide e gas ossidabili

I fattori che influenzano la capacità di adsorbimento di un filtro a carboni attivi sono:

le caratteristiche del composto da adsorbire: composti poco polari, mostrano un'affinità maggiore di composti polari; nel caso di miscele, i composti a minor pressione parziale tendono a "spostare", cioè a rimuovere dal sito in cui si sono fissati, i composti a pressione parziale maggiore. Questo comporta che la capacità di adsorbimento di un certo composto varia in funzione che sia presente da solo o in miscela con altri;

le caratteristiche del carbone: se il diametro delle particelle diminuisce, aumenta la superficie attiva disponibile, ma il letto è più impaccato e aumentano le perdite di carico del sistema. Il carbone può essere utilizzato in polvere, in granuli o estruso. La forma fisica a massima superficie attiva è la prima, ma viene utilizzata in applicazioni specifiche, ad esempio per la filtrazione delle emissioni da inceneritori, nelle quali viene garantita la movimentazione del materiale (letto fluido, dispersione su filtri a maniche). Di uso più comune nell'adsorbimento dei COV da linee produttive, sono i granuli e i cilindretti estrusi; per questi ultimi un diametro di 3 mm risulta abbastanza comunemente

usato, risultando un buon compromesso per ottimizzare superficie attiva del filtro e portata del flusso di aria;

velocità dell'aria da trattare: questo fattore regola il tempo di contatto e quindi influenza la diffusione delle sostanze da adsorbire all'interno della massa; tuttavia per velocità troppo basse, la massa d'aria perde forza di penetrazione nel solido e non viene sfruttato a pieno il potere adsorbente del sistema, con conseguente perdita di efficienza. Il campo di valori tecnici utilizzati è compreso tra 0,05 e 0,4 metri/secondo;

presenza di umidità: in presenza di umidità relativa superiore al 70% nell'aria da trattare, il carbone attivo adsorbe anche l'acqua, aumentando così lo strato di saturazione. Ciò comporta meno disponibilità di superficie per l'adsorbimento delle componenti organiche volatili e quindi sarà necessario sovradimensionare opportunamente il filtro, oppure condensare l'umidità dell'aria a monte del filtro stesso. Per garantire condizioni ottimali l'umidità dell'aria deve essere mantenuta a valori inferiori al 60%;

temperatura: poiché il processo di formazione dei legami è esotermico, l'adsorbimento risulta favorito da condizioni di temperatura relativamente bassa, generalmente non superiore a 60 °C;

presenza di "veleni": per veleni si intendono sostanze che si accumulano sulla superficie del solido in modo permanente riducendo la sua capacità di adsorbimento: può trattarsi di composti chimici che reagiscono aderendo alla superficie del carbone, oppure di polveri disperse che si depositano: nel caso delle polveri se la loro quantità non è elevata, possono essere dilavate nel corso della rigenerazione con vapore, in caso contrario devono essere filtrate a monte del sistema a carbone attivo con filtri a secco (lane apprettate, o materiale sintetico).

L'avvelenamento viene rivelato dalla diminuzione drastica dell'efficienza d'abbattimento.

Il dimensionamento del sistema viene fatto sulla base delle portate, concentrazioni dell'aria da trattare (compreso il tenore di umidità), della temperatura, della necessità di inserire una prefiltrazione per l'abbattimento delle polveri.

La rigenerazione consiste in un trattamento (termico, per depressione, per strippaggio con azoto, aria, o vapore) che liberi dalle molecole trattenute sulla superficie del solido: tale trattamento sfrutta sia l'effetto meccanico dovuto alla pressione e alla quantità di fluido rigenerante, sia l'effetto termico che si ottiene mediante riscaldamento diretto del letto, o mediante cessione di calore da parte del fluido rigenerante.

La scelta deve tener conto della compatibilità del fluido di strippaggio con le sostanze da estrarre:

- per sostanze solubili in acqua va evitato il vapore in quanto produce una soluzione che richiede ulteriore trattamento per il recupero della sostanza strippata, lasciando le acque di contatto contaminate;
- per sostanze infiammabili non deve essere usata aria calda, ma gas inerte;
- per sostanze altobollenti conviene operare sotto vuoto, per sfruttare le differenze tra le temperature di ebollizione ed effettuare la separazione.

Nel caso si utilizzi lo strippaggio con vapore, il letto di carbone attivo prima di essere riutilizzato in un ciclo di filtrazione, deve essere sottoposto ad un ulteriore trattamento termico di asciugatura che viene generalmente effettuato con aria calda secca: nel caso la rigenerazione non si sia protratta sufficientemente a lungo, l'aria in uscita dalla fase di asciugatura può risultare contaminata. Il vapore strippato viene avviato al condensatore dove si effettua la separazione solvente – acqua e l'efficienza della rigenerazione dipende da pressione e portata del vapore. Il sistema è piuttosto costoso, in quanto per il recupero di 1 kg di solvente occorrono 3 - 4 kg di vapore, ciò nonostante il suo uso è molto diffuso.

In alcune disposizioni impiantistiche per abbattere questo costo è possibile associare al filtro a carboni una camera di combustione che brucia il solvente o la miscela acqua solvente, utilizzando l'energia termica così ottenuta per produrre vapore saturo: l'inserimento della camera di combustione comporta consumi di gasolio per le fasi di avviamento. Comunque nei casi in cui il solvente strippato sia una miscela di diversi composti, può diventare più conveniente il suo utilizzo come combustibile, piuttosto che riciclarlo all'uso originale.

In seguito a qualsiasi trattamento di rigenerazione il carbone dovrà essere raffreddato prima di avviarlo al successivo ciclo operativo.

Ad ogni ciclo di rigenerazione, il potere adsorbente del solido si riduce progressivamente e quindi la diminuzione di efficienza di abbattimento viene raggiunta in tempi sempre più brevi. E' possibile pertanto raggiungere una condizione per cui il materiale adsorbente risulta saturato e non più rigenerabile in sito; a questo punto deve essere sostituito e sottoposto al trattamento termico o chimico con cui è stato prodotto in origine.

Per determinare il momento in cui diventa opportuno effettuare la rigenerazione è necessario valutare la concentrazione in emissione: un sistema analitico molto preciso, è il TOC analyzer, che però comporta un notevole costo di investimento e richiede per il suo utilizzo personale preparato. Un sistema alternativo, di recente sviluppo, si basa sul principio della termoconducibilità che esegue la misura di un composto individuato come tracciante, utilizzando uno specifico elettrodo. Questo sistema comporta costi che variano tra il 50 e il 70 % del costo di un TOC, ma risulta essere meno selettivo in presenza di miscele di solventi, e non permette la separazione dei composti metanici dai non metanici.

Si distinguono le seguenti disposizioni impiantistiche:

a letto fisso :

carboni attivi a perdere (filtri a cartucce)

carboni attivi con rigenerazione

a letto fluido :

sistemi con stripping in gas inerte e condensazione

Le più diffuse disposizioni impiantistiche sono quelle a letto fisso.

Il dispositivo utilizzato è generalmente costituito da un reattore contenente uno strato di carbone attivo che viene attraversato dal flusso di aria da trattare. In questo sistema si possono distinguere tre zone dal punto di immissione dell'aria al punto di uscita, i cui imiti si spostano con il procedere del processo: zona di equilibrio di saturazione, zona di trasferimento di massa e zona libera. Immaginando di identificare in tempi successivi le tre zone, si riscontrerebbe la seguente situazione: inizialmente una prima fascia in ingresso in condizioni di saturazione, una fascia successiva in condizioni di riempimento progressivo e un'ultima fascia vergine verso l'uscita; dopo un certo tempo la fascia in condizioni di saturazione risulta aumentata e quella interessata dal riempimento progressivo si avvicina all'uscita del letto, riducendo così la fascia di materiale vergine. Al procedere del processo la fascia in condizioni di saturazione interesserà una quota sempre maggiore del volume del filtro, fino ad annullarne il potere di adsorbimento, condizione questa in cui l'efficienza di abbattimento si annulla. Il sistema risulterà operare in condizioni ottimali quanto più lontano sarà mantenuto da questa situazione.

I filtri a cartucce si utilizzano nei casi in cui non è conveniente la rigenerazione del letto in sito, cioè con flussi gassosi diluiti. Ad esaurimento del potere adsorbente la cartuccia viene sostituita ed il materiale esausto viene avviato al trattamento di riattivazione, presso il fornitore, o smaltito. Il sistema è strutturalmente compatto, ma poco flessibile e trova applicazione in impianti di piccole dimensioni per usi specifici (ad esempio, l'abbattimento degli odori).

I sistemi con rigenerazione consistono in reattori contenenti letti di carbone attivo, che in funzione dello spessore si distinguono in letti sottili (fino a 300 mm) e letti spessi (da 300 a 1500 mm). I primi, caratterizzati da basse perdite di carico, sono adatti a flussi d'aria con alte portate e basse concentrazioni di inquinanti e vengono avviati a rigenerazione dopo cicli brevi di funzionamento. Per concentrazioni di circa 1 gr/Nmc è conveniente la rigenerazione in continuo effettuata operando con batterie di due o più letti. I parametri operativi possono assumere i seguenti valori: velocità superficiale 0.1 – 0.3 m/sec; dimensione delle particelle di carbone di 3 – 4 mm; altezza letto tra 0.5 e 1.5 m.

Il sistema a letto fluido consiste in un impianto di notevole complessità in cui il carbone attivo in forma di polvere (granulometria molto sottile) viene movimentato di continuo. Il sistema a causa dell'elevata superficie specifica, è molto sensibile alla presenza di impurezze che possono inattivarne il potere adsorbente. Il sistema non trova comunemente applicazione nel settore di verniciatura e lavaggio.

Indipendentemente dalla soluzione impiantistica, le variabili che definiscono il sistema come parametri di dimensionamento e di processo sono:

- concentrazione e portata in ingresso
- granulometria
- superficie specifica attiva
- velocità di attraversamento
- isoterma di assorbimento (sostanze da adsorbire e tipo di carbone più adatto)
- potere adsorbente

Gli impianti possono essere a letto fisso o a letto mobile.

<b>CARBONI ATTIVI - RIGENERAZIONE INTERNA</b>	
1. Temperatura	40 °C.
2. Tipo di C.A.	Vegetale Minerale
3. Perdite di carico totali	
4. Superficie specifica	1250 m <sup>2</sup> /g
5. Perdita di carico nel letto adsorbente	200 mm c.a. o 2 kPa
6. Altezza del letto	500 mm
7. Tipo di fluido rigenerante	Vapore a bassa pressione, azoto caldo o gas inerte
8. Velocità di attraversamento dell'effluente gassoso del C.A.	0,4 m/s
9. Tempo di contatto	1,5 s
10. Umidità relativa	60%
11. Sistemi di controllo	Analizzatore in continuo tipo FID da installarsi solo per flussi di massa di COV 50 kg/h.
12. Tasso di carico	a) 12% per mono solventi affini per il carbone b) 8% per miscele di solventi o per solventi basso bollenti
13. Manutenzione	Controllo dei sistemi rigenerazione del carbone come indicato obbligatoriamente dal costruttore
14. Informazioni aggiuntive	Sostituzione e/o integrazione del carbone attivo ogni 3000 ore di lavoro effettivo. Assenza di MEK, di stirene e metilmetacrilato monomero nelle emissioni trattate.

<b>CARBONI ATTIVI - RIGENERAZIONE ESTERNA</b>	
1. Temperatura	40 °C. 5 °C [*] solo per adsorbimento degli idrofluorocarburi
2. Tipo di C.A.	Vegetale Minerale
3. Perdite di carico	
4. Superficie specifica	1250 m <sup>2</sup> /g
5. Perdita di carico nel letto adsorbente	200 mm c.a.
6. Altezza del letto	500 mm
7. Tipo di fluido rigenerante	Nessuno
8. Velocità di attraversamento dell'effluente gassoso del C.A.	0,4 m/s
9. Tempo di contatto	1,5 s
10. Umidità relativa	60%

11. Sistemi di controllo	Analizzatore in continuo tipo FID da installarsi solo per flussi di massa di COV 50 kg/h
12. Tasso di carico	c) 12% per mono solventi affini per il carbone d) 8% per miscele di solventi o per solventi basso bollenti
13. Manutenzione	Sostituzione del carbone esausto secondo quanto previsto dal tasso di carico (punto 12)
14. Informazioni aggiuntive	- Assenza di MEK nel fluido da trattare. - La rigenerazione del carbone esausto dovrà essere effettuata presso soggetti esterni o con apparecchiatura di rigenerazione annessa all'impianto di abbattimento, ed operante ad almeno 700 °C. Le emissioni di COV generate dalla rigenerazione dovranno essere trattate in un combustore o sistema equivalente.

<b>CARBONI ATTIVI A STRATO SOTTILE - RIGENERAZIONE ESTERNA</b>	
1. Temperatura	40 °C.
2. Tipo di C.A.	Vegetale Minerale
3. Perdite di carico	
4. Superficie specifica	1350 m <sup>2</sup> /g
5. Perdita di carico nel letto adsorbente	200 mm c.a. o 2 kPa
6. Altezza di ogni strato	50 mm
7. Tipo di fluido rigenerante	Non previsto
8. Velocità di attraversamento dell'effluente gassoso del C.A.	0,5 m/s
9. Tempo di contatto	s
10. Umidità relativa	60%
11. Sistemi di controllo	Celle di carico per la determinazione dell'aumento del peso conseguente all'adsorbimento.
12. Tasso di carico	a) 10% per mono solventi affini per il carbone b) 6% per miscele di solventi o per solventi basso bollenti
13. Manutenzione	Sostituzione del carbone esausto secondo quanto previsto dal tasso di carico (punto 12)
14. Informazioni aggiuntive	a) Installazione a monte di un sistema di prefiltrazione ed assenza di MEK e metilmetacrilato monomero nell'effluente gassoso. b) La rigenerazione del carbone esausto dovrà essere effettuata presso soggetti esterni.

### **Campi di applicazione e limiti di operatività**

Il sistema si applica per la cattura di molti composti organici (esteri, eteri, idrocarburi saturi e insaturi, idrocarburi alogenati, composti aromatici) utilizzati nelle vernici come solventi e diluenti, e come sgrassanti negli impianti di lavaggio.

Si applica in tutti i casi in cui si voglia recuperare il prodotto adsorbito, quindi in generale quando si hanno prodotti singoli o miscele con un numero limitato di componenti.

Il sistema trova applicazione per portate inferiori a 50.000 Nmc/h in quanto a portate maggiori il volume di ingombro diventa notevole; .

In generale in funzione delle caratteristiche del materiale (granulometria e superficie specifica) si può considerare che 100 Kg di carbone attivo trattengano da 12 a 20 kg di solvente.

Limiti all'utilizzo dei filtri a carboni attivi si hanno con effluenti contenenti potenziali "veleni" (composti che possano interagire con il carbone riducendone sensibilmente la superficie specifica) come polveri inorganiche, sostanze altobollenti, e sostanze organiche sotto forma particellare (residui di vernice), sostanze come lo stirene, solvente relativamente diffuso nelle vernici, che polimerizza sul carbone.

L'applicazione del sistema a carboni attivi non conviene anche nel caso in cui le sostanze da abbattere abbiano scarsa affinità per l'adsorbente, ad esempio sostanze molto polari come gli alcoli: in questo caso infatti per ottenere una percentuale di abbattimento soddisfacente sarebbe necessario allungare in maniera eccessiva i tempi di contatto.

#### **CARBONI ATTIVI - RIGENERAZIONE INTERNA**

Operazioni di dry cleaning con COV (composti organici volatili) o COC (composti organici clorurati)  
Operazioni di stampa, verniciatura, impregnazione, spalmatura, resinatura, adesivizzazione, accoppiatura, tampografia e litografia di substrati di vario tipo con prodotti a solvente;  
Operazioni di produzione vernici, collanti, adesivi, pitture e/o prodotti affini con solventi;  
Operazioni con emissioni di COV non espressamente riportate;

#### **CARBONI ATTIVI - RIGENERAZIONE ESTERNA**

Operazioni di dry cleaning con COV (composti organici volatili) o COC (composti organici clorurati) e/o idrofluoroclorocarburi [\*]  
Operazioni di stampa, verniciatura, impregnazione, spalmatura, resinatura, adesivizzazione, accoppiatura, tampografia e litografia di substrati di vario tipo con prodotti a solvente;  
Operazioni di produzione vernici, collanti, adesivi, pitture e/o prodotti affini con solventi;  
Operazioni di manufatti in vetroresina, accessori in resina poliestere e in altre resine polimeriche;  
Operazioni con emissioni di COV non espressamente indicate

#### **CARBONI ATTIVI A STRATO SOTTILE - RIGENERAZIONE ESTERNA**

Operazioni di dry cleaning con COV (composti organici volatili) o COC (composti organici clorurati) senza utilizzo di idrofluoroclorocarburi [\*]  
Operazioni di verniciatura, resinatura, adesivizzazione, accoppiatura, tampografia e litografia di substrati di vario tipo con prodotti a solvente;

Nella tabella che segue è riportata una classificazione delle sostanze in funzione della possibilità di essere adsorbite sui carboni attivi. Tale classificazione è indicativa in quanto la capacità d'adsorbimento dei carboni risente a parità di composizione dell'aria da trattare dell'effetto di altre variabili, ovvero concentrazione del prodotto nell'aria, grado di umidità, temperatura, velocità di passaggio.

**Sostanze nei confronti delle quali i carboni attivi dimostrano un'elevata capacità di adsorbimento**

Acetato di amile	Decano	Cicloesano	Monocloridrina di glicole
Acetato di butile	Dibromoetano	Dimetilsolfato	Monoclorobenzolo
Acetato di cellosolve	Diclorobenzolo	Diossano	Naftalina
Acetato di etile		Dipropilcetone	Nicotina
Acetato di isopropile	Dicloreetano	Etere amilico	Nitrobenzolo
Acetato di metilcellosolve	Benzina	Etere butilico	Nitroetano
Acetato di propile	Dicloretilene	Etereisopropilico	Nitrometano
Acido acetico	Dicloretilere	Etere propilico	Nitropopano
Acido acrilico	Dicloronitroetano	Etilbenzolo	Nitrotoluolo
Acido butirrico	Dicloronitroetano	Etilmercaptano	Nonano
Acido lattico	Dicloropropano	Eptano	Octano
Acido propionico	Dietilcetone Bromo	Eptilene Indolo	Ozono
Acido solforico	Butilcellosolve	Iodio	Ossido di mesitile
Acrilato di etile	Canfora	Iodoformio	Pentanone
Acrilato di metile	Cellosolve	Cherosene	Percloroetilene
Acrlonitrile	Clorobenzolo	Mentolo	Fenolo
Alcool amilico	Clorobutadiene	Mercaptani	Propilmercaptano
Alcool butilico	Cloroformio	Metilbulchetone	Silicato di etile
Alcool etilico	Cloronitropropano	Metilcellosolve	Stirola monomero
Alcool isopropilico	Cloropicrina	Metilcloroformio	Trementina
Alcool propilico	Cloruro di butile	Metiletilchetone	Tetracloretano
Anidride acetica	Cloruro di metilene	Metilisobutilchetone	Tetracloroetilene
Anilina	Cloruro di propile	Metilcicloesano	Tetracloruro di carbonio
Benzolo	Composti solforati	Metilcicloesanol	Toluolo
Cicloesanol	Creosoto	Metilcicloesanon	Toluidina
Cicloesanon	Creosolo	Metilmercaptano	Toluidina
	Crotonaldeide		Tricloroetilene
			Xilolo

**Sostanze nei confronti delle quali i carboni attivi dimostrano una buona capacità di adsorbimento**

Acetone	Anidride solforica	Diclorotetrafluoroetano	Idrogeno solforato
Acetato di metile	Bromuro di etile	Dietilamina	Isoprene
Acido cianidrico	Bromuro di metile	Etere etilico	Monofluorotriclorometano
Acido formico	Butadiene Cloro	Etere metilico	Ossido di etilene
Acido iodidrico	Cloruro di etile	Fluorotriclorometano	Pentano
Acido nitrico	Cloruro di metile	Formiato di etile	Pentene
Acroleina	Cloruro di vinile	Formiato di metile	Fosgene
Alcool metilico	Diclorodifluorometano	Freon	Solventi diversi
Aldeide propionica	Dicloromonofluorometano	Gas tossici	Solfuro di carbonio
		Esano	Etilamina

<b>Sostanze poco adsorbite dai carboni attivi in condizioni normali</b>		
Acetaldeide Acido bromidrico Acido cloridrico Acido fluoridrico	Ammine Ammoniaca Biossido d'azoto Butano	Butene Formaldeide Gas solforosi Propano Propene
<b>Sostanze praticamente non adsorbite dai carboni attivi in condizioni normali</b>		
Acetilene Acido carbonico	Etano Etilene	Idrogeno Metano

### **Efficienza di abbattimento**

Nella prima fase di utilizzo del sistema, quando il carbone risulta vergine, l'efficienza d'abbattimento dipende, a parità di altri fattori, dalla capacità di adsorbimento del sistema; questo parametro diminuisce al procedere del processo a causa della saturazione del filtro.

Per efficienza d'abbattimento si intende il rapporto tra la differenza delle concentrazioni di COV in ingresso e uscita, e la concentrazione di COV in ingresso.

Considerando di operare in condizioni lontane dalla saturazione, l'efficienza di abbattimento dipende dalla composizione dell'aria da trattare, ovvero dalla polarità dei composti e, nel caso di miscele, dalla pressione parziale nelle condizioni di adsorbimento. Rispetto alla composizione dell'aria da trattare va tenuta in particolare considerazione la presenza di acqua come umidità dell'aria, l'eventuale presenza di potenziali veleni "chimici", la presenza di polveri o particelle solide, che riducono la superficie attiva ai fini dell'assorbimento; se quest'ultimo problema può essere controllato conoscendo la composizione dei prodotti utilizzati ed inserendo opportuni filtri, la presenza di umidità nell'aria da trattare può essere un problema solo periodico, quando, in presenza di solventi igroscopici, il tenore di umidità atmosferica risulti particolarmente elevato.

I parametri che devono essere considerati nella fase di progettazione sono:

- le caratteristiche fisiche del carbone, che vanno scelte ottimizzando la granulometria per evitare eccessive perdite di carico e ostruire i pori del filtro;
- velocità dell'aria da trattare, che deve essere regolata al valore che permette un tempo di contatto sufficiente evitando che si instaurino condizioni di moto tangenziale che riducono il contatto aria – superficie attiva;
- temperatura: poiché il processo di formazione dei legami è esotermico, l'adsorbimento risulta favorito da condizioni di temperatura relativamente bassa, generalmente non superiore a 60 °C.

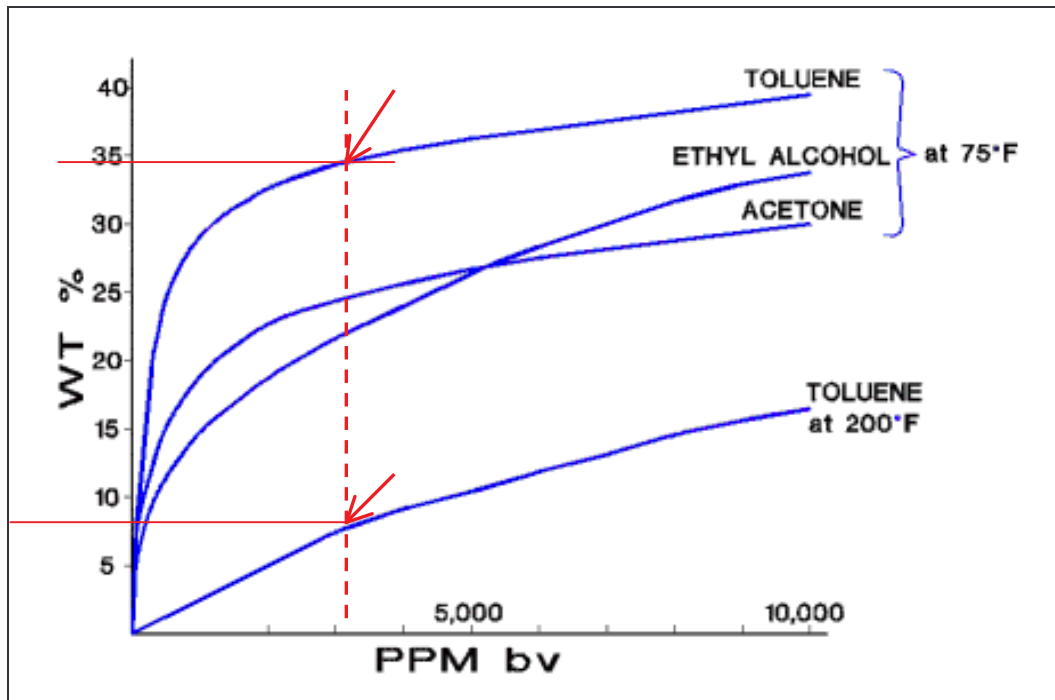
Dal punto di vista della gestione del sistema, l'efficienza dipende anche dalla frequenza dei cicli di rigenerazione e adsorbimento e può essere aumentata operando in condizioni di massima capacità del sistema. La rigenerazione, infatti, deve essere avviata prima che sia esaurita la capacità di adsorbimento del filtro.

Questi impianti raggiungono efficienze d'abbattimento almeno pari al 90%. Modificando la frequenza dei cicli di rigenerazione e adsorbimento possono essere raggiunte rese superiori.

La frequenza di rigenerazione varia in un campo molto ampio, da una volta al giorno a una o due volte a settimana, anche in relazione alla struttura dell'impianto stesso (presenza di una o due unità di abbattimento) e all'organizzazione dei cicli lavorativi in azienda.

Nel grafico che segue è riportato un diagramma che rappresenta le isoterme d'assorbimento per diversi composti e a diverse temperature. Al crescere della concentrazione (ppm bv = mg/litro in volume) cresce la percentuale in peso di adsorbimento (WT %): per alcol etilico e acetone le isoterme sono abbastanza simili, ma si vede come a concentrazioni superiori a 5 ppm per il primo si registra una capacità di adsorbimento superiore. Le due isoterme relative al toluene permettono

di vedere l'effetto della temperatura: infatti aumentando la temperatura da 25°C a 100 °C la percentuale di adsorbito scende dal 35% al 9% .

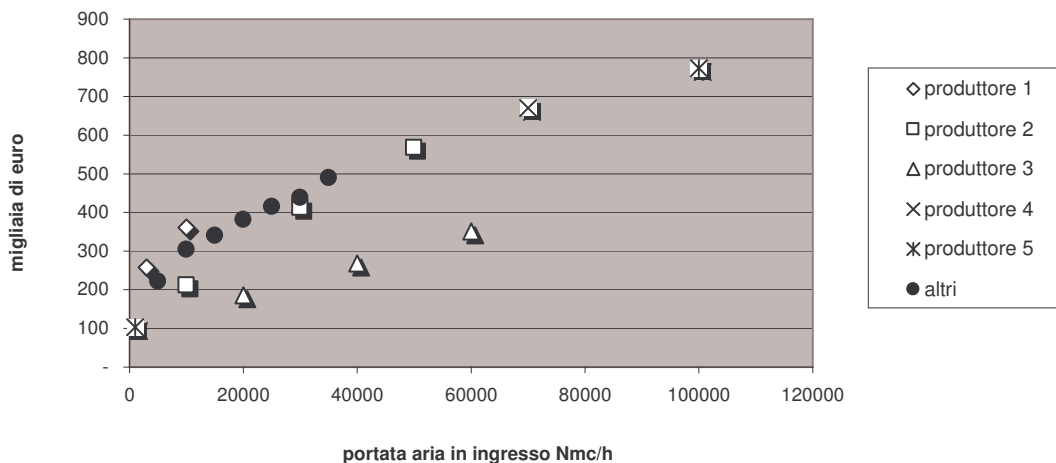


Impianti a carboni attivi: isoterme d'adsorbimento; Fonte: www.amcec.com

**Costi di investimento e di esercizio**

I costi di investimento variano in funzione delle dimensioni (volumi d'aria da trattare espressi in Nmc/h, concentrazioni in COV), della durata prevista della fase di adsorbimento, del tipo di carbone, del livello di controllo automatico inserito nelle fasi. Il letto adsorbente, comprendente la struttura di contenimento e il carbone attivato, rappresenta fino al 90% degli oneri complessivi di investimento.

Si riportano a titolo esemplificativo i preventivi per due taglie impiantistiche destinate rispettivamente ad essere inserite a valle di un impianto di lavaggio e di un impianto di verniciatura. Nel diagramma che segue sono riportati i dati relativi ai costi di investimento come dichiarati da diversi fornitori di impianti nel 2001.



Dei 17 dati utilizzati solo 3 riguardano impianti di taglia superiore ai 50000 Nmc/h: a queste portate infatti l'ingombro del sistema è notevole e così pure i costi, e l'uso di questa tecnologia non è più vantaggioso.

Per quanto riguarda gli altri dati, si nota una certa variabilità soprattutto alle taglie più basse, 10000 Nmc/h e 20000 Nmc/h, dove eventuali variabili impiantistiche hanno un'incidenza notevole sul costo complessivo.

Nel diagramma successivo si presenta una rielaborazione delle informazioni, prendendo in considerazione i valori medi di investimento in Euro per impianti fino a 35000 Nmc/h (cioè le dimensioni maggiormente presenti sul mercato). Come si evidenzia dalla interpolazione lineare dei dati, il costo di investimento cresce di un fattore proporzionale rispetto alla portata.

I costi annui di esercizio sono determinati dai seguenti fattori: energia elettrica, combustibile ausiliario, acqua, ricambi dei dispositivi di filtrazione.

Nella tabella che segue è riportata la suddivisione delle voci di costo:

Voce di costo	Composizione %
Carbone attivo (sostituzioni)	15 - 25%
Energia elettrica	30 - 40%
Acqua	2 - 5%
Combustibile	15 - 20%
Smaltimento carbone e acqua	10 - 25 %
Ricambi incluso materiale filtrante	10 - 15%

**Fonte: elaborazione Ambiente Italia su dati indagine**

Si nota come il maggior costo sia da attribuire al consumo di energia elettrica, dovuto essenzialmente alla potenza assorbita dai ventilatori. Il 17 % rappresenta il costo per la produzione di vapore (acqua e combustibile) e il costo di smaltimento del carbone e delle eventuali acque contaminate di solvente si attesta intorno al 18%.

Come abbiamo evidenziato il costo di sostituzione del carbone incide mediamente per il 20% sul totale dei costi di esercizio. La sostituzione del carbone attivo viene effettuata per garantire che il sistema si trovi sempre lontano dalle condizioni di saturazione, rendendo così massima l'efficienza d'assorbimento.

Per valutare il momento in cui è necessario reintegrare il reattore con carbone vergine, si dovrebbe valutare costantemente l'efficienza d'abbattimento per intervenire quando se ne registra una diminuzione. In realtà, dato un certo sistema a regime, ovvero un flusso di aria con una certa portata ed una certa concentrazione media di COV, la sostituzione viene fatta con una frequenza prefissata che dipende dalle dimensioni iniziali del reattore e quindi dalla massa di carbone e dalle caratteristiche del prodotto che nella fase di utilizzo produce i COV.

Gli interventi di manutenzione consistono in rabbocchi/sostituzione di carbone effettuati da personale specializzato, generalmente il fornitore stesso dell'impianto, e controllo di parti del sistema come valvole, condotti ecc., operazioni che possono essere effettuate nell'ambito delle normali manutenzioni ordinarie dell'impianto.

### **Vantaggi e svantaggi nell'utilizzo, anche in termini di impatti sulle altre componenti ambientali**

La tecnica risulta particolarmente vantaggiosa quando sia possibile recuperare il solvente adsorbito mediante strippaggio al fine di riutilizzarlo come tale o per recupero energetico.

Per portate oltre 40000 – 50000 Nmc/h il sistema assume dimensioni di ingombro elevate.

Va utilizzato solo quando si è certi dell'assenza di potenziali veleni o di sostanze che inattivano anche temporaneamente il filtro.

**Fonti:**

“Indagine, nei processi di verniciatura e di pulizia delle superfici, delle potenzialità di riduzione fornite dall’applicazione della direttiva comunitaria sulla limitazione dell’uso di solventi in alcune lavorazioni industriali: indagine sugli impianti di abbattimento dei solventi” Ricerca realizzata da: Ambiente Italia srl, istituto di ricerche e coordinata da ENEA, Centro Ricerche Casaccia Ambiente, Divisione Caratterizzazione dell’Ambiente e del Territorio, 2002

“L’aria e l’azienda” W. Formenton, Associazione artigiani della provincia di Vicenza, 1989

**Nota:** i riquadri a fondo grigio riportano le indicazioni contenute nella D.G.R. Lombardia 15/12/2000, n° 7/2663